

А.С. ЕГИАЗАРЯН
Л.С. ЗИМИН

ВИБРОЗАЩИТА МОЩНЫХ ИНДУКТОРОВ

VIBRATION PROTECTION OF POWERFUL INDUCTORS

Рассматриваются электродинамическая и виброакустическая проблемы, возникающие при индукционном нагреве тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относится нагрев слэбов под прокатку. Рекомендуется электродинамические расчеты проводить на численной математической модели, построенной с использованием метода связанных контуров и принципа возможных перемещений. Для численного решения вибрационной задачи целесообразно использовать метод конечных элементов. В самом общем случае для расчета распределённых усилий по всему индуктору использован закон Био-Савара-Лапласа, который позволяет определить настил тока в слэбе. При исследовании вибродинамической модели индуктора была синтезирована форма оптимальной оболочки индуктора по критерию минимального шумоизлучения (максимальной жесткости).

Ключевые слова: электродинамические силы, вибрации, индуктор, проектирование, шум, слэб, система «индуктор-металл»

Основным фактором, препятствующим широкому внедрению мощных индукционных установок для нагрева тел прямоугольной формы, например слэбов, является сильная вибрация обмотки индуктора, которая сопровождается шумом, превышающим санитарные нормы, и может привести к разрушению установки. Поэтому актуальными и своевременными являются вопросы:

- разработки методов расчета электродинамических и виброакустических характеристик устройств индукционного нагрева крупногабаритных слитков прямоугольного сечения;
- разработки рекомендаций и предложений, которые можно использовать уже на стадии проектирования индукционных установок.

Electrodynamic and vibroacoustic problems during induction heating of solids with variable curvature of surface – primarily heating of slabs for rolling – are viewed. It is recommended to perform electrodynamic calculation on numerical model developed through coupled circuits method and virtual displacement law. For numerical solution of vibration problem it is worth to use finite-element method. In the general case for calculating of distributed forces Biot-Savart-Laplace's law is used. This law permits to definite surface current density in a slab. Through inductor vibration model studies the form of inductor optimal shell is synthesized according to the criterion of minimal noise emissions.

Keywords: electromagnetic force, vibration, inductor, design, noise, slab, system «inductor – metal»

В случае индукционного нагрева тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слэбы, возникает проблема, которая определяется тем, что электромагнитные процессы в системе «индуктор-металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе (поперечный краевой эффект) [1,2]. При этом необходимо учитывать также объемную плотность электромагнитного поля и связанные с ней электродинамические усилия [3,4]. Если в плавильных печах электродинамические силы могут улучшить перемешивание жидкого металла, то при индукционном нагреве под деформацию механическое проявление электромагнитной энергии играет резко отрицательную роль, так как

появляется проблема устойчивости конструкций индукторов против вибраций, возникающих под действием электродинамических сил [5–7]. Особенно остро эта проблема проявляется при индукционном нагреве прямоугольных заготовок, как правило, из немагнитных металлов [8]. Это явление может быть использовано в производстве для получения искусственных вибраций с целью их полезного применения, например, при воздействии на формовочные смеси [9].

В индукторах для нагрева цилиндрических заготовок отсутствуют условия для возникновения значительных вибраций (круглое поперечное сечение обладает большой естественной жесткостью [10]), а в индукторах прямоугольной формы необходимо принимать во внимание малую устойчивость прямолинейных участков обмотки индуктора. Причем суть проблемы представляет не механическая прочность медной трубки индуктора, поскольку возникающие напряжения изгиба гораздо меньше допустимых для меди, а сильная вибрация и сопровождающий ее шум, которые, если не принимать специальных мер, значительно превышают санитарные нормы для производственных помещений [11,12].

Таким образом, возникает задача оптимального проектирования вибростойких индукционно-нагревательных установок (ИНУ) на основе исследования электродинамических и связанных с ними виброакустических процессов [13,14]. Электродинамические расчеты целесообразно проводить на численной математической модели, построенной с использованием метода связанных контуров и принципа возможных перемещений.

При этом электродинамическое взаимодействие в системе «индуктор-металл» сводится к взаимодействию совокупности индуктивно связанных контуров, по одним из которых протекают токи индуктора, а по другим – вихревые токи. Электродинамические силы в такой расчетной системе можно определить через энергию электромагнитного поля (ЭМП) – W_M контуров P (характеризует индуктор) и R (характеризует сляб):

$$\vec{F} = \text{grad} W_M; \quad W_M = I_P I_R M_{P,R} / 2. \quad (1)$$

Формула (1) подразумевает двойное суммирование – по P и R , причем если $P \neq R$, то $M_{P,R}$ – взаимоиנדуктивность контуров, а в противном случае $M_{P,R}$ – их собственные индуктивности.

Расчет акустического излучения любого объёмного тела следует рассматривать как связанную

упругоакустическую задачу. Однако её решение в строгой математической постановке возможно только для ограниченного круга идеализированных колебательных систем. Поэтому с допустимой степенью упрощения поставленная задача разбивается на две: вначале рассчитываются колебания системы под действием известной электродинамической нагрузки без учета влияния среды, а затем определяется акустическое излучение при заданных колебаниях.

Для численного решения вибрационной задачи целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ). Учитывая форму границ индуктора, в данном случае применены прямоугольные конечные элементы (КЭ). Переход от системы с бесконечным числом параметров напряженно деформированного состояния к системе с конечным числом степеней свободы осуществляется в результате ансамблирования КЭ, при этом математическая модель задачи представляется системой дифференциальных уравнений

$$[M] [W]'' + [C] [W]' + ([K] + [F]) [W] = [G], \quad (2)$$

где $[K]$, $[M]$, $[C]$ – матрицы жесткости, массы и демпфирования ансамбля КЭ; $[G]$, $[F]$ – векторы центробежной и осевой нагрузок; $[W]$, $[W]''$ – вектор узловых перемещений и его двойная производная.

Для интегрирования системы (2) был выбран Θ -метод Вилсона. В итоге на каждом временном шаге с помощью процедуры LDL^T-факторизации решается система линейных алгебраических уравнений относительно КЭ параметров вибраций в узлах расчетной сетки КЭ. Вопросы звукового излучения мощных ИНУ являются довольно сложной задачей, которая характеризуется как особенностями самой ИНУ, так и помещением, где она расположена. В первом приближении решение акустической задачи можно получить с использованием одночленной формулы Грина, по которой вычисляется потенциал $\Psi(x,y,z,t)$ звукового поля ограниченной пластины, если известны её виброперемещения W :

$$\Psi = \frac{1}{2} \frac{1}{\pi} \iint_S W(x,y,z,\tau) \frac{e^{-ikr}}{r} ds; \quad P = -\rho_0 \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность среды; r – расстояние от элемента поверхности пластины ds до точки наблюдения; $k = \omega/c_0$ – волновое число; c_0 – скорость звука в среде, $\omega = 4\pi f$ – угловая частота звука, равная удвоенной частоте тока в индукторе.

Выражения (3) могут служить первым приближением при решении поставленной задачи, когда ограничиваются рассмотрением вибрации лишь широкой грани индуктора. В этом случае акустическая мощность, излучаемая индуктором, будет равна

$$P_A = \rho_0 c_0 \left(\iint_S V_s(x, z) ds \right)^2 \frac{\delta}{S}, \quad (4)$$

где $\rho_0 c_0$ – акустическое сопротивление воздуха; S – площадь звукоизлучающей поверхности индуктора; $V_s(x, z)$ – функция распределения эффективной виброскорости индуктора, определяемая в результате интегрирования системы (2); δ – коэффициент излучения индуктора.

Допуская, что широкая грань индуктора есть пластина с двумя жестко закрепленными ребрами и двумя свободными, то коэффициент излучения индуктора можно приближенно рассчитать по выражению

$$\delta = \frac{P c_0}{\pi^2 S f_k} \sqrt{\frac{f_u}{f_k}}, \quad \forall f_u < f_k, \\ \delta \approx 1 \quad \forall f_u > f_k, \quad (5)$$

где f_u – основная частота звука, излучаемая индуктором, равная удвоенной частоте питающего тока; Π – периметр широкой грани индуктора; f_k – критическая частота, при которой длина волны в материале индуктора равна длине звуковой волны в воздухе. Уровни акустической мощности L_p и звукового давления L_d индуктора рассчитываются по формулам

$$L_p = L_v + 10 \lg S + 10 \lg \delta + k_0, \\ L_d = L_p - 10 \lg S - k_0, \text{ дБ}, \quad (6)$$

где $L_v = 20 \lg \left[\left(\frac{1}{S} \iint_S V_s(x, z) ds \right) / V_0 \right]$ – уровень виброскорости относительно порогового значения $V_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ см/с; k_0 – корректирующая поправка на атмосферные условия.

Вектор независимых параметров, определяющих виброакустические характеристики ИНУ, можно представить в виде

$$\vec{K} = [\vec{x}, \vec{h}, \vec{\alpha}] \in \Omega_k, \quad (7)$$

где $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор геометрии окна индуктора и его числа витков; $\vec{h} = (h_1, h_2, h_3)$ – вектор размера

оболочки; $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ – вектор формы оболочки индуктора; Ω – область допустимых значений.

Состав вектора может быть расширен путем введения дополнительных параметров, характеризующих новые признаки ИНУ и её элементов.

При проектировании вибростойкой конструкции индуктора вектор критериев оптимизации можно представить в виде

$$I = (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6), \quad (8)$$

где I – условные обозначения, соответственно: $I_1 = L_p$ – уровень звуковой мощности ИНУ; I_2 – полный вес индуктора; I_3 – максимальное значение амплитуды перемещений обмотки индуктора; I_4 – максимальное значение амплитуды виброскорости обмотки индуктора; I_5 – электрический КПД индуктора; I_6 – коэффициент мощности.

Критерии I_1, I_2, I_3, I_4 подлежат минимизации, а I_5, I_6 – максимизации, хотя их также можно привести к минимизируемым через потери активной и реактивной мощностей. Совокупность математических моделей, описывающих поведение системы «индуктор-металл», можно представить в виде операторного уравнения связи

$$L_i(\vec{k}, \vec{u}_i) = 0, \quad \forall \vec{k} \in \Omega_k, \quad \vec{u}_i \in \Omega_u, \quad (9)$$

где \vec{u}_i – вектор, отражающий пространство переменных состояния системы; i – размерность моделей.

Задача векторной оптимизации формулируется следующим образом: «Найти вектор конструктивных параметров ИНУ (7), который минимизирует вектор-функционал (8) для объекта, описываемого оператором (9)».

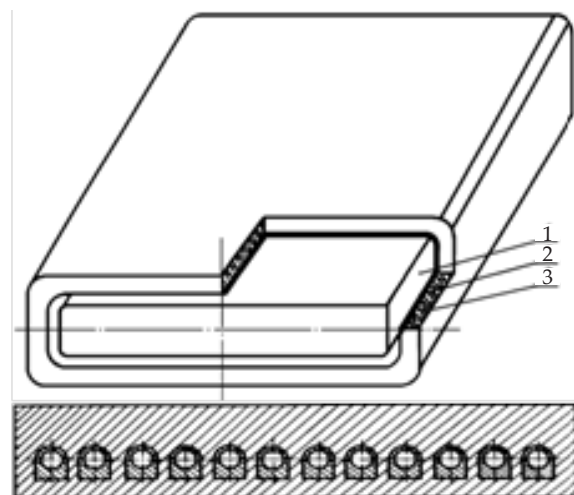


Рис. 1. Эскиз индуктора для нагрева слябов:
1 – сляб; 2 – футеровка; 3 – индуктор с изоляцией

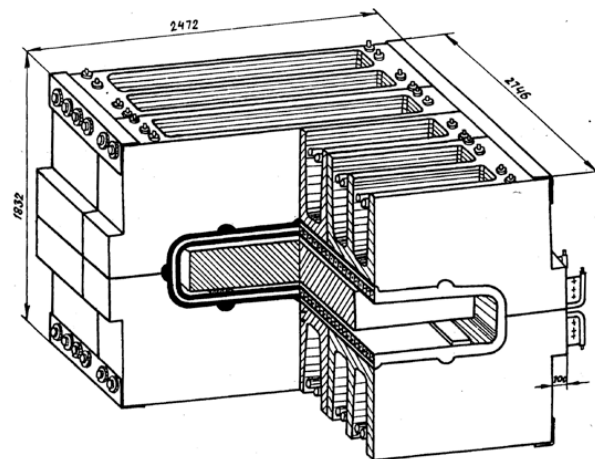


Рис. 2. Виброзащитный индуктор

Решение поставленной задачи выполняется зондированием пространства параметров и критериев пробными точками с помощью ЛПт-последовательности.

В самом общем случае для определения распределённых усилий по всему индуктору был использован закон Био-Савара-Лапласа, который позволяет найти вектор магнитной индукции в электрических системах любой сложности и тем самым определить настил тока в слябе, как показано на рис. 1. Затем, разбив заготовку на конечное число прямоугольных контуров и определив по выражению значения токов в этих контурах, а также найдя значение тока в обмотке индуктора с учетом взаимоиндуктивности, рассчитанной по известной формуле двух коаксиальных прямоугольников по методу ряда Тейлора, были определены электродинамические усилия как на обмотку индуктора, так и на поверхность заготовки.

При исследовании вибродинамической модели индуктора была синтезирована форма оптимальной оболочки индуктора по критерию минимального шумоизлучения (максимальной жесткости). На рис. 2 показана индукционная установка промышленной частоты для нагрева алюминиевого сляба размерами 0,3x1,24x2,4 м. Обмотка индуктора мощностью 1500 кВт, выполненная медной трубкой 26x32 мм со смещенным отверстием диаметром 18 мм, армирована стеклопластиком и заключена в бетонные блоки оптимальной формы. Шум такой установки не превышал 65 дБ, а без бетонных блоков, как на рис.1, достигал 125 дБ.

Выводы. 1. При проектировании индукционных установок для нагрева крупных заготовок пря-

моугольной формы, особенно из алюминия и его сплавов, например, слябов перед прокаткой, обязательно надо учитывать электродинамические и виброакустические процессы.

2. В данном случае индуктор необходимо армировать стеклопластиком и помещать в бетонную оболочку оптимальной формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зимин Л.С. Индукционный нагрев тел прямоугольной формы // *Электротермия*. М., 1969. Вып. 86. С. 24–25.
2. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2010. №7 (28). С. 231–233.
3. Zimin L.S. Electrodynamics processes at induction heating. International symposium on electromagnetic fields in electrical engineering, ISEF, 1989. Poland, Lodz, p. 301–304.
4. Zimin L.S. Electrodynamics forces at induction heating. 40 Internationales wissenschaftliches kolloquium. Vortagsreihe. Ilmenau, Germany, 1995. Band 4, s. 66–71.
5. Zimin L.S. Acoustic and vibration problems at induction heating. HIS-98. Proceedings of International Induction Heating Seminar. Padua, Italy, s. 499–505.
6. Зимин Л.С. Вибростойкость прямоугольных систем индукционного нагрева. Теория и практика индукционного нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1985. 170 с.
7. Зимин Л.С., Каримов Д.А. Моделирование электродинамических усилий в системах индукционного нагрева немагнитных тел прямоугольной формы // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2004. №20. С. 121–126.
8. А.с. 347100 СССР. Виброплощадка / Зимин Л.С., Тихонов И.Н., Лукин К.А. №1630865; заявл. 22.03.71; опубл. 10.08.72, Б.И. №24.
9. Зимин Л.С., Каримов Д.А. Моделирование электродинамических усилий в системах индукционного

нагрева цилиндрической формы // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». 2002. Вып. 16. С. 203–205.

10. *Зимин Л.С., Каримов Д.А.* Оптимизация индукционных систем по электродинамическим параметрам // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2002. Вып. 14. С. 185–190.

11. *Зимин Л.С., Каримов Д.А.* Оптимизация индукционных систем по электродинамическим параметрам // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2002. Вып. 14. С. 185–190.

12. *Зимин Л.С.* Математические модели виброакустических процессов // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». 1998. Вып. 4. С. 146–148.

13. *Зимин Л.С., Каримов Д.А.* Definition of differential performances of the electromagnetic field in systems of induction heating of nonmagnetic bodies of the rectangular form // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2004. Вып. №2. С.165–171.

14. А.с. 154555 СССР. Индукционная печь / Зимин Л.С., Гецелев З.Н., Аганин С.Д., Рапопорт Э.Я., Сабуров В.В. №773323; заявл. 10.04.62; опубл. 14.03.63, Б.И. №10.

15. А.с. 1669085 СССР. Устройство для индукционного нагрева слябов / Зимин Л.С., Сутягин А.Ф., Хасаева Л.И., Яицков С.А. №4425222; опубл. 07.08.91, Б.И. №29.

Об авторах:

ЕГИАЗАРЯН Александра Сергеевна

кандидат технических наук, доцент кафедры электро-снабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (902)371-57-52
E-mail: epp@samgtu.ru

YEGHIAZARYAN Alexandra S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (902) 371-57-52
E-mail: epp@samgtu.ru

ЗИМИН Лев Сергеевич

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (902)371-57-52
E-mail: epp@samgtu.ru

ZIMIN Lev S.

Honored Worker of Science, Doctor of Engineering Science, Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (902) 371-57-52
E-mail: epp@samgtu.ru

Для цитирования: *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Виброзащита мощных индукторов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №3(24). С. 135-139. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.22.

For citation: *Zimin L.S., Yeghiazaryan A.S.* Vibration protection of powerful inductors // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. №3(24). Pp. 135-139. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.22.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕСТИТЬ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА СТРАНИЦАХ НАШЕГО ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК СГАСУ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА». ИНФОРМАЦИЯ О ВАШЕЙ КОМПАНИИ ОБЯЗАТЕЛЬНО НАЙДЕТ СВОИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СРЕДИ НАШЕЙ ЦЕЛЕВОЙ АУДИТОРИИ.

ПО ВСЕМ ВОПРОСАМ РАЗМЕЩЕНИЯ РЕКЛАМНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБРАЩАТЬСЯ
В ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ, тел.: (846) 339-14-38